Martin, Heinz

4. Ermittlung des Erddrucks auf eine Stützwand mit geneigter Rückenfläche bei Annahme gekrümmter Gleitflächen

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

4. Ermittlung des Erddrucks auf eine Stützwand mit geneigter Rückenfläche bei Annahme gekrümmter Gleitflächen

Auf Bild 4.1 stellt die durch den Wandpunkt O und den Punkt S verlaufende gekrümmte Linie eine Gleitfläche des im aktiven Grenzzustand befindlichen Halbraums dar. Es kann vorausgesetzt werden, daß rechts dieser Gleitfläche der für den unbegrenzten Halbraum gültige und nach Abschnitt 3 exakt ermittelbare Spannungszustand herrscht. Für den Bereich zwischen dieser Gleitfläche und der Stützwand läßt sich dagegen weder der Spannungszustand noch das Gleitflächennetz mathematisch genau bestimmen. Für diesen Bereich werden deshalb zwei Annahmen getroffen:

1. Die für die Berechnung maßgebende, durch den Fußpunkt der Stützwand verlaufende Gleitfläche kann in diesem Bereich genau genug durch eine Zylinderfläche dargestellt werden, wobei zwischen dieser und der nach Abschnitt 3 für die gedachte lotrechte Wand von der Höhe h' maßgebenden Gleitfläche ein stetiger Übergang vorhanden ist (Tangente der Gleitfläche im Punkt S und Horizontale bilden den Winkel ϑ). Auf die Einhaltung des unter gewissen Voraussetzungen ermittelbaren Gleitflächenwinkels an der Stützwand (s. Abschnitt 4.3) wird dabei verzichtet.
2. Die am zylindrischen Gleitflächenabschnitt unter dem Winkel φ wirkenden Spannungen, deren Resultierende die Kraft Q darstellt, sind trapezförmig verteilt (Bild 4.2).

4.1. Rechnungsgang (vgl. Bild 4.1)

- Wahl der Höhe h' der gedachten lotrechten Wand.
- Ermittlung von $\bar{\bar{x}}$ nach Abschnitt 3 und damit Bestimmung der Geometrie des zwischen gedachter lotrechter Wand und Stützwand liegenden Gleitkörperteils.
- Ermittlung der Kräfte E_{ah} und E_{av} nach Abschnitt 3.
- Ermittlung der Kräfte $(P + G)$, C und C_w.

- Ermittlung der Wirkungslinie von Q , d.h. Bestimmung des Winkels ε^* , wobei das Verhältnis $n = \sigma_{g1} / \sigma_{g2}$ zunächst gewählt wird.
- Ermittlung des Maximums von E_w bzw. E_{wh} und der zugehörigen Q-Kraft aus dem Krafteck (Bild 4.1) durch Wiederholung der Rechnung mit verschiedenen Höhen h' .
- Ermittlung von $\bar{Q}$ als Resultierende der σ_g-Spannungen längs des zylindrischen Gleitflächenabschnitts (Bild 4.2) mit dem nach Abschnitt 3.4 zu bestimmenden σ_{g2} und dem gewählten Verhältniswert $n = \sigma_{g1} / \sigma_{g2}$ für den Fall $E_{w\,max}$.
- Wiederholung des bisherigen Rechnungsganges mit variierten Verhältniswerten n bis $Q = /\bar{Q}/$.
- Bestimmung des Angriffspunktes des unter der Bedingung $Q = /\bar{Q}/$ gefundenen $E_{w\,max}$ bzw. $E_{wh\,max}$, d.h. Ermittlung von M (vgl. Bild 4.1).

Die Erddruckberechnung nach diesem Verfahren ist nur dann vertretbar, wenn sie mit Hilfe eines elektronischen Rechners durchgeführt wird. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Erddruckberechnungen wurde eine Großrechenanlage benutzt.

4.2. Ermittlung der angreifenden Kräfte (Bild 4.1)

Die Komponenten des Erddrucks auf die gedachte lotrechte Wand von der Höhe h' :

Die Horizontalkomponente E_{ah} wird nach Abschnitt 3 bestimmt. Die Vertikalkomponente ergibt sich dann aus

$$E_{av} = E_{ah} \cdot b \, .$$

Das Gewicht des Gleitkörperteils zwischen Stützwand und gedachter lotrechter Wand einschließlich der Verkehrslast:

$$G+P=(p+\gamma\cdot h_c')\cdot B+\gamma\cdot\frac{B^2\cdot b}{2}+\gamma\cdot\frac{D(h'-B\cdot b)}{2}$$
$$+\gamma\cdot\frac{h_w'\cdot D}{2}+\gamma\cdot\frac{h_w'^2\cdot a}{2}+\gamma\cdot\frac{R^2}{2}(\alpha'-\sin\alpha'). \qquad (4/2)$$

Die Kohäsionskraft an der Wand:

$$C_W=c_W\cdot h'_W\cdot\frac{1}{\cos\alpha}=c_W\cdot h'_W\sqrt{1+a^2}. \qquad (4/3)$$

Die Resultierende des Kohäsionsanteils der Scherspannungen längs des zylindrischen Gleitflächenabschnitts:

$$C=c\cdot\sqrt{F^2+D^2}. \qquad (4/4)$$

In diesen Formeln stellen a und b wieder die Tangensfunktionen der Winkel α und β dar (s. Bild 2.1).

B, D und F lassen sich leicht nach Bild 4.1 angeben:

$$B=\bar{x}\frac{1}{\sqrt{1+b^2}}+h'\cdot\frac{b}{1+b^2},$$

$$D=B-h'_W\cdot a=\bar{x}\cdot\frac{1}{1+b^2}+h'\cdot\frac{b}{1+b^2}-h'_W\cdot a,$$

$$F=h'_W+\bar{x}\cdot\frac{b}{\sqrt{1+b^2}}-h'\cdot\frac{1}{1+b^2}.$$

Die Ermittlung des Winkels ε^* , der die Wirkungsrichtung der Kraft Q bestimmt, erfolgt nach der in [10] angegebenen Methode.

Zunächst werden nach Bild 4.2 die Resultierenden Q' und Q'' der parallel und senkrecht zur mittleren Spannung σ_{gm} gerichteten Spannungskomponenten σ' und σ'' bestimmt:

$$Q'=\int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'}\sigma'\,db=\int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'}\sigma_g\cdot\cos\left(\omega'-\frac{\alpha'}{2}\right)\cdot R\cdot d\omega',$$

$$Q''=\int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'}\sigma''\,db=\int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'}\sigma_g\cdot\sin\left(\omega'-\frac{\alpha'}{2}\right)\cdot R\cdot d\omega'.$$

Da bei trapezförmiger Spannungsverteilung

$$\sigma_g = \sigma_{g1} + \frac{\sigma_{g2} - \sigma_{g1}}{R \cdot \alpha'} \cdot R \cdot \omega'$$

ist, kann für

$$Q' = \sigma_{g1} \cdot R \int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'} \cos\left(\omega' - \frac{\alpha'}{2}\right) d\omega' + \frac{\sigma_{g2} - \sigma_{g1}}{\alpha'} \cdot R \int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'} \cos\left(\omega' - \frac{\alpha'}{2}\right) \omega' d\omega'$$

und für

$$Q'' = \sigma_{g1} \cdot R \int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'} \sin\left(\omega' - \frac{\alpha'}{2}\right) d\omega' + \frac{\sigma_{g2} - \sigma_{g1}}{\alpha'} \cdot R \int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'} \sin\left(\omega' - \frac{\alpha'}{2}\right) \omega' d\omega'$$

geschrieben werden.

Die Integration ergibt schließlich

$$Q' = R \cdot \sin\frac{\alpha'}{2} \left(\sigma_{g1} + \sigma_{g2}\right) \qquad (4/5)$$

bzw.

$$Q'' = R \cdot \left(\frac{\sin\frac{\alpha'}{2}}{\frac{\alpha'}{2}} - \cos\frac{\alpha'}{2} \right) \cdot \left(\sigma_{g2} - \sigma_{g1}\right). \qquad (4/6)$$

Der Winkel ε^* errechnet sich sodann aus

$$\tan\varepsilon^* = \frac{Q''}{Q'}$$

zu

$$\tan\varepsilon^* = \frac{\sigma_{g2} - \sigma_{g1}}{\sigma_{g1} + \sigma_{g2}} \cdot \left(\frac{1}{\frac{\alpha'}{2}} - \frac{1}{\tan\frac{\alpha'}{2}} \right)$$

bzw. mit $\frac{\sigma_{g1}}{\sigma_{g2}} = n$

zu $$\tan\varepsilon^* = \frac{1-n}{n+1} \cdot \left(\frac{1}{\frac{\alpha'}{2}} - \frac{1}{\tan\frac{\alpha'}{2}} \right). \qquad (4/7)$$

Da auch der Winkel δ , unter dem die Erddruckkraft an der Wand angreift, bekannt ist, kann nunmehr das Krafteck gezeichnet werden (Bild 4.1). Mit Hilfe dieses Kraftecks lassen sich folgende Gleichungen aufstellen:

$$\Sigma H = 0 = E_{ah} + Q \cdot \sin(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*) + C_W \cdot \sin\alpha - C \cdot \cos\vartheta_W'$$
$$- E_W \cdot \cos(\delta + \alpha) \, ,$$

$$\Sigma V = 0 = E_{av} + P + G - C_W \cdot \cos\alpha - C \cdot \sin\vartheta_W' - E_W \cdot \sin(\delta + \alpha)$$
$$- Q \cdot \cos(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*) \, .$$

Aus beiden Gleichungen findet man

$$Q = \frac{E_W \cdot \cos(\delta + \alpha) + C \cdot \cos\vartheta_W' - E_{ah} - C_W \cdot \sin\alpha}{\sin(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)} \qquad (4/8)$$

bzw.

$$Q = \frac{E_{av} + G + P - C_W \cdot \cos\alpha - C \cdot \sin\vartheta_W' - E_W \cdot \sin(\delta + \alpha)}{\cos(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)} \qquad (4/9)$$

und durch Gleichsetzung dieser Ausdrücke den Erddruck auf die Stützwand:

$$E_W = (G + P) \cdot \frac{\tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)}{\cos(\delta + \alpha) + \sin(\delta + \alpha) \cdot \tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)}$$
$$- C_W \cdot \frac{\cos\alpha \cdot \tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*) - \sin\alpha}{\cos(\delta + \alpha) + \sin(\delta + \alpha) \cdot \tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)}$$
$$- C \cdot \frac{\sin\vartheta_W' \cdot \tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*) + \cos\vartheta_W'}{\cos(\delta + \alpha) + \sin(\delta + \alpha) \cdot \tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)}$$
$$+ E_{ah} \cdot \frac{b \cdot \tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*) + 1}{\cos(\delta + \alpha) + \sin(\delta + \alpha) \cdot \tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)} \, . \qquad (4/10)$$

Die Horizontalkomponente von E_W ist

$$E_{Wh} = E_W \cdot \cos(\delta + \alpha) \, . \qquad (4/11)$$

Der nächste Schritt ist die Belastung der $\bar{Q}$-Kraft.
Man findet sie aus

$$\bar{Q}=\sqrt{Q'^2+Q''^2}$$

bzw. unter Berücksichtigung der Gleichungen 4/5 und 4/6 aus

$$\bar{Q}=R\sqrt{\sigma_{g1}{}^2+\sigma_{g2}{}^2-2\sigma_{g1}\cdot\sigma_{g2}\cdot\cos\alpha'+(\sigma_{g2}-\sigma_{g1})^2\cdot\frac{\sin^2\frac{\alpha'}{2}-\frac{\alpha'}{2}\sin\alpha'}{\left(\frac{\alpha'}{2}\right)^2}}\,.$$

Setzt man für $\sigma_{g1}/\sigma_{g2}=n$, so ist

$$\bar{Q}=R\cdot\sigma_{g2}\sqrt{n^2+1-2n\cdot\cos\alpha'+(1-n)^2\cdot\frac{\sin^2\frac{\alpha'}{2}-\frac{\alpha'}{2}\sin\alpha'}{\left(\frac{\alpha'}{2}\right)^2}}\,. \qquad (4/12)$$

σ_{g2} wird hierbei mit Hilfe der Gleichungen 3/8, 3/14, 3/17 oder 3/19 ermittelt.

Ist durch Wiederholungsrechnungen mit verschiedenen Höhen h' und durch Variierung des Spannungsverhältnisses n das Maximum des Erddrucks E_w unter der Bedingung $Q=|\bar{Q}|$ (Gl. 4/8 u. Gl. 4/12) bestimmt, so muß nun doch der Angriffspunkt von $E_{w\,max}$ ermittelt werden. Man findet ihn, indem man das Moment von $E_{w\,max}$ um O der Summe der Momente der übrigen Kräfte um den Punkt O gleich setzt:

$$E_w\cdot\cos\delta\cdot M=E_{av}\cdot B+E_{ah}(z^*-B\cdot b)+(G+P)\cdot L-Q\cdot a^*-Q\cdot J$$
$$-C\cdot a_c{}^*-C\cdot K\,. \qquad (4/13)$$

Folgende Glieder bzw. Größen dieser Gleichung ergeben sich unmittelbar aus Bild 4.1:

$$J=V\cdot\cos(\vartheta_w'-\varphi+\varepsilon^*)-U\cdot\sin(\vartheta_w'-\varphi+\varepsilon^*),$$
$$K=V\cdot\sin\vartheta_w'+U\cdot\cos\vartheta_w',$$
$$U=h_w'-R\cdot\cos\left(\vartheta_w'-\frac{\alpha'}{2}\right)=h_w'-R\cdot\cos(2\vartheta_w'-\vartheta),$$
$$V=h_w'\cdot a-R\cdot\sin\left(\vartheta_w'-\frac{\alpha'}{2}\right)=h_w'\cdot a-R\cdot\sin(2\vartheta_w'-\vartheta),$$

$$(G+P)\cdot L = (p+\gamma\cdot h_c')\cdot\frac{B^2}{2}+\gamma\cdot\frac{B^3\cdot b}{3}+\gamma\cdot\frac{D(h'-B\cdot b)}{2}\left(\frac{2}{3}D+h_w'\cdot a\right)$$

$$+\gamma\cdot\frac{h_w'\cdot D}{2}\cdot\left(\frac{D}{3}+h_w'\cdot a\right)+\gamma\,\frac{h_w'^3\cdot a^2}{3}$$

$$+\gamma\cdot\frac{R^2}{2}(\alpha'-\sin\alpha')\left(V+\frac{2R\cdot\sin\frac{\alpha'}{2}}{\alpha'}\cdot\sin\vartheta_w'\right),$$

$$C\cdot a_c^* = c\cdot R^2\cdot\alpha'.$$

$Q\cdot a^*$ wird anhand des Bildes 4.2 gefunden:

$$Q\cdot a^* = |\overline{Q}|\cdot a^* = R^2\cdot\sin\varphi\int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'}\sigma_g\cdot d\omega'$$

bzw. mit $\sigma_g = \sigma_{g1}+\frac{\sigma_{g2}-\sigma_{g1}}{\alpha'}\cdot\omega'$

$$Q\cdot a^* = R^2\cdot\sin\varphi\left[\sigma_{g1}\int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'}d\omega'+\frac{\sigma_{g2}-\sigma_{g1}}{\alpha'}\int_{\omega'=0}^{\omega'=\alpha'}\omega'\cdot d\omega'\right].$$

Die Integration ergibt dann

$$Q\cdot a^* = R^2\cdot\sin\varphi\left[\sigma_{g1}\cdot\alpha'+\frac{\alpha'}{2}(\sigma_{g2}-\sigma_{g1})\right].$$

Mit $\sigma_{g1}/\sigma_{g2} = n$ und $\sin\varphi = \frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}}$ ist

$$Q\cdot a^* = R^2\cdot\frac{\mu}{\sqrt{1+\mu^2}}\cdot\sigma_{g2}\cdot\frac{\alpha'}{2}(n+1).$$

Für die Winkelfunktionen der Gleichungen 4/8 bis 4/13 gelten nachstehende Beziehungen, wobei auch die auf Bild 2.1 angegebenen Bezeichnungen der Tangensfunktionen verwendet wurden:

$$\cos(\alpha+\delta) = \frac{1-m\cdot a}{\sqrt{(1+a^2)(1+m^2)}},$$

$$\sin(\alpha+\delta) = \frac{m+a}{\sqrt{(1+a^2)(1+m^2)}},$$

$$\cos\delta = \frac{1}{\sqrt{1+m^2}},$$

$$\tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*) = \frac{\tan\vartheta_W' - \mu + \tan\varepsilon^* + \tan\vartheta_W' \cdot \tan\varepsilon^* \cdot \mu}{1 + \tan\vartheta_W' \cdot \mu - \tan\varepsilon^* \cdot \tan\vartheta_W' + \tan\varepsilon^* \cdot \mu},$$

$$\tan\vartheta_W' = \frac{F}{D} = \frac{h_W'(1+b^2) - h' + \bar{x} \cdot b\sqrt{1+b^2}}{\bar{x} \cdot \sqrt{1+b^2} + h' \cdot b - h_W' \cdot a(1+b^2)},$$

$$\cos(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*) = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)}},$$

$$\sin(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*) = \frac{\tan(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)}{\sqrt{1+\tan^2(\vartheta_W' - \varphi + \varepsilon^*)}},$$

$$\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+a^2}},$$

$$\sin\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+a^2}},$$

$$\sin\vartheta_W' = \frac{\tan\vartheta_W'}{\sqrt{1+\tan^2\vartheta_W'}},$$

$$\cos\vartheta_W' = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\vartheta_W'}},$$

$$\cos(2\vartheta_W' - \vartheta) = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2(2\vartheta_W' - \vartheta)}} = \frac{1+\tan\vartheta_W'(2\tan\vartheta - \tan\vartheta_W')}{(1+\tan^2\vartheta_W')\sqrt{1+\tan^2\vartheta}},$$

$$\sin(2\vartheta_W' - \vartheta) = \frac{\tan(2\vartheta_W' - \vartheta)}{\sqrt{1+\tan^2(2\vartheta_W' - \vartheta)}} = \frac{2\tan\vartheta_W' - \tan\vartheta(1-\tan^2\vartheta_W')}{(1+\tan^2\vartheta_W')\sqrt{1+\tan^2\vartheta}},$$

$$\sin\alpha' = \sin(2\vartheta - 2\vartheta_W') = \frac{2[\tan\vartheta(1-\tan^2\vartheta_W') - \tan\vartheta_W'(1-\tan^2\vartheta)]}{(1+\tan^2\vartheta)(1+\tan^2\vartheta_W')},$$

$$\cos\frac{\alpha'}{2} = \cos(\vartheta - \vartheta_W') = \frac{1+\tan\vartheta\tan\vartheta_W'}{\sqrt{(1+\tan^2\vartheta)(1+\tan^2\vartheta_W')}}$$

$$tg\,\frac{\alpha'}{2} = \tan(\vartheta - \vartheta'_w) = \frac{\tan\vartheta - \tan\vartheta'_w}{1 + \tan\vartheta \tan\vartheta'_w}\,.$$

$\tan\vartheta$ wird nach Abschnitt 3.5 (Bild 3.2) ermittelt:

$$\tan\vartheta = \tan(\varepsilon + \beta) = \frac{\tan\varepsilon + b}{1 - \tan\varepsilon \cdot b}$$

mit $\tan\varepsilon$ nach Gl. 3/10 unter Berücksichtigung der Gl. 3/5, wobei für

$$\sigma = \frac{h' \cdot \gamma + p'}{1 + b^2}$$

zu setzen ist.

Außerdem gilt:

$$R = \frac{\sqrt{F^2 + D^2}}{2\sin(\vartheta - \vartheta'_w)} = \frac{\sqrt{F^2 + D^2} \cdot \sqrt{(1 + \tan^2\vartheta)(1 + \tan^2\vartheta'_w)}}{2(\tan\vartheta - \tan\vartheta'_w)}$$

$$\alpha' = \frac{\pi \cdot \alpha'^{0}}{360} = \mathrm{Arc}\tan(\tan\alpha')\,,$$

$$\frac{\alpha'}{2} = \frac{\pi \cdot \alpha'^{0}}{360} = \mathrm{Arc}\tan\left(\tan\frac{\alpha'}{2}\right).$$

Damit können nach Gl. 4/10 die Erddruckkraft $E_{w\,max}$ und aus Gl. 4/13 ihr durch M gegebener Angriffspunkt bestimmt werden. (Lotrechter Abstand der Angriffspunkte: $M_v = M/\sqrt{1 + a^2}$.) Die vorstehenden Formeln gelten übrigens auch dann, wenn $\vartheta < \vartheta'_w$ ist. In diesem Falle verläuft der zylindrische Gleitflächenabschnitt nach oben konvex (Bild 4.3 u. 4.4).

α', R und $\tan\varepsilon^*$ werden dann negativ und sind somit in die vorstehenden Formeln mit negativen Vorzeichen einzusetzen.

4.3. Der Winkel der Gleitfläche an der Wand

Nach Bild 4.5 gelten folgende Beziehungen:

$$\frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{c}{\mu} + \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} = \sin\varphi$$

und

$$\tau_{WI,II} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot 2\sin\psi_{1,2} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{c_W}{m} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\cos 2\psi_{1,2}\right) m.$$

Daraus ergibt sich

$$\sin 2\psi_{1,2} - \cos 2\psi_{1,2} \cdot m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot \frac{c_W}{m}}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot \frac{c}{\mu}} \cdot \frac{m}{\sin\varphi}$$

bzw. mit

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot \frac{c_W}{m}}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot \frac{c}{\mu}} = A \quad ,$$

$$\sin 2\psi_{1,2} = 2\sin\psi_{1,2} \cdot \cos\psi_{1,2} = \frac{2\tan\psi_{1,2}}{1 + \tan\psi_{1,2}} \quad ,$$

$$\cos 2\psi_{1,2} = 2\cos^2\psi_{1,2} - 1 = \frac{1 - \tan^2\psi_{1,2}}{1 + \tan^2\psi_{1,2}}$$

und

$$\frac{m}{\sin\varphi} = \frac{m\sqrt{1 + \mu^2}}{\mu}$$

$$\tan\psi_{1,2} = \frac{\pm\sqrt{\mu^2 \cdot m^2(1 + A^2) - m^2 A^2 + \mu^2} - \mu}{m\left(\mu - A\sqrt{1 + \mu^2}\right)} \quad . \quad (4/14)$$

Für $\tan\ \psi_2$ ist die Wurzel des Zählers positiv und für $\tan\ \psi_1$ negativ anzusetzen.

Es gibt somit für den Fall $\tau_w < \tau$ zwei Gleitflächenwinkel, bei denen das Grenzgleichgewicht der Spannungen erreicht ist. Nur wenn $c_w = c$ und $\delta = \varphi$ ist, wird $\vartheta_I = \vartheta_{II} = \varphi$ (vgl. Bild 4.5 b; dann Wand = gestrichelte Linie).

Aus Bild 4.5 b können die Winkel ϑ_I und ϑ_{II} abgelesen werden:

$$\vartheta_I = \psi_1 + \frac{\varphi}{2} - 45,$$
$$\vartheta_{II} = \psi_2 + \frac{\varphi}{2} - 45. \tag{4/15}$$

Da jedoch die Hauptspannungen σ_1 und σ_3 im Wandbereich nicht bestimmt werden können, lassen sich die Winkel ψ_1 und ψ_2, d.h. somit ϑ_I und ϑ_{II} nur für die Sonderfälle

$$c = c_W = 0,$$

und

$$\frac{c}{\mu} = \frac{c_W}{m}$$

ermitteln. In diesen Fällen ergibt sich für $A = 1$.

Mit $A = 1$ geht Gl. 4/14 in

$$\tan\psi_{1,2} = \frac{\pm\sqrt{\mu^2 - m^2} - \mu}{m\left(\mu - \sqrt{1+\mu^2}\right)} \tag{4/16}$$

über.

Der Gleitflächenwinkel an der Wand errechnet sich dann wie folgt:

$$\tan\vartheta_{I,II} = \tan\left[\psi_{1,2} - \left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)\right] \quad (\text{vergl. Gl. } 4/15)$$

$$= \frac{\tan\psi_{1,2} - \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}{1 + \tan\psi_{1,2}\cdot\tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}.$$

Unter Berücksichtigung von Gl. 4/16 und mit

$$\tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) = \left(\sqrt{1+\mu^2} - \mu\right)$$

findet man

$$\tan \vartheta_{I,II} = \frac{(\sqrt{1+\mu^2}+\mu)^2 \cdot m - (\pm\sqrt{\mu^2-m^2}+\mu)}{(\sqrt{1+\mu^2}+\mu)\,[\pm\sqrt{\mu^2-m^2}+\mu+m]}$$

bzw. durch weitere Umformung

$$\tan \vartheta_{I,II} = \mu \pm \sqrt{(1+\mu^2)\ \frac{\mu - m}{\mu + m}} \quad , \qquad (4/17)$$

wobei das positive Vorzeichen der Wurzel für $\tan \vartheta_I$ und das negative für $\tan \vartheta_{II}$ gilt.

Ein weiterer Sonderfall ist gegeben, wenn die Stützflächen vollkommen glatt sind ($m = 0$, $c_w = 0$). Wie aus Bild 4.5 ohne weiteres zu erkennen ist, fallen dann die Stützwandflächen mit den Hauptspannungsflächen zusammen, d.h. die Gleitflächenwinkel ergeben sich zu

$$\vartheta_{I,II} = \pm 45 + \frac{\varphi}{2}$$

bzw. ihre Tangensfunktionen zu

$$\tan \vartheta_{I,II} = \mu \pm \sqrt{1+\mu^2} \qquad (4/18)$$

5. Ergebnisse der nach beiden Verfahren (Abschnitt 2 und 4) durchgeführten Erddruckberechnungen.

Die den Untersuchungen zugrunde gelegten bodenmechanischen und geometrischen Parameter und deren Kombinationen sind aus den Tafeln 5.1 bis 5.6 zu ersehen. Die gewählten bodenmechanischen Werte entsprechen den physikalischen Eigenschaften von in der Natur vorkommenden Erdstoffen.

Neben der Größe ist auch der Angriffspunkt der Erddruckkraft für die Standsicherheit einer Stützwand von Bedeutung. Während man es bei der Berechnungsmethode mit ebenen Gleitflächen im allgemeinen unterläßt, den Angriffspunkt (z.B. nach der in Abschnitt 2 dargestellten Methode) zu ermitteln, er-